



物理学专业基础实验——半导体 α 谱仪和 α 粒子能量损失

刘元彻 PB21020505 21 级物理学院 1 班

2024 年 5 月 16 日

摘要: 半导体 α 谱仪是粒子物理实验领域常用的实验仪器, 本实验利用 α 谱仪进行试验, 帮助我们了解金硅面垒半导体探测器、谱仪的工作原理和特性, 同时了解 α 粒子通过物质时的能量损失及其规律。

关键词: α 谱仪, 粒子物理, 能量分辨率, α 粒子能量损失

1 实验原理 [1]

1.1 α 粒子能量损失

天然放射性物质放出的 α 粒子, 能量范围是 3–8MeV。在这个能区内, α 粒子的核反应截面很小, 可以忽略。粒子与原子核之间虽然有可能产生卢瑟福散射, 但几率较小。它与物质的相互作用主要是与核外电子的相互作用。粒子与电子碰撞, 将使原子电离、激发而损失能量。在一次碰撞中, 具有质量 m , 能量 E 的带电粒子, 转移给电子 (质量为 m_e) 的最大能量约为 $\frac{4Em_e}{m}$, α 粒子的质量远大于电子, 所以每碰撞一次, 只有一小部分能量转移给电子。当它通过吸收体时, 经过多次碰撞后, 才损失较多能量。每一次碰撞后, α 粒子的运动方向基本上不发生偏转, 因而它通过物质的轨迹可以看作直线。带电粒子在吸收体内单位路程上的能量损失即能量损失率 $-\frac{dE}{dx}$, 称为线性阻止本领, 记作 S :

$$S = -\frac{dE}{dx} \quad (1)$$

并定义阻止截面:

$$\Sigma_e = -\frac{1}{N} \frac{dE}{dx} \quad (2)$$

其中, N 为吸收体单位体积内的原子个数。实际上, 对于非相对论 α 粒子 ($v \ll c$), 可以得到线性阻止本领为:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N Z}{m_e v^2} \ln \frac{2m_e v^2}{I} \quad (3)$$

其中, z 为入射粒子的电荷数, Z 为吸收体的原子序数, e 为电子电荷, v 为入射粒子的速度, I 为吸收体中原子的平均激发能。实际上, 上式中对数的变化是缓慢的, 因此我们可以近似得到:

$$-\frac{dE}{dx} = -\frac{\text{Const}}{E} \quad (4)$$

当 α 粒子穿过厚度为 ΔX 的吸收体后, 能量变化 $E_1 \rightarrow E_2$, 因此可以写成:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{mean} \Delta X \quad (5)$$

其中, $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{mean}$ 为平均能量 $\frac{E_1 + E_2}{2}$ 的能量损失率。这样测定了 α 粒子在通过薄箔后的能量损失 ΔE , 利用 (5) 式就可以得到薄箔的厚度, 即:

$$\Delta X = \frac{\Delta E}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{mean}} \approx \frac{\Delta E}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{E_1}} \quad (6)$$



实际上，当 α 粒子能量损失较小时，(6) 式是比较合理的，但若 α 粒子的能量损失较大，(6) 式应该改写为：

$$\Delta X = \int_{E_2}^{E_1} \frac{dE}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_E} \approx \sum_{E_1}^{E_2} \frac{\delta E}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{E_1}} \quad (7)$$

上式中 δE 可以取 10KeV，实际上在这个范围内，可以将 S 看作常量。下图即表示 ^4He 离子在铝中的阻止截面与能量关系的实验结果：

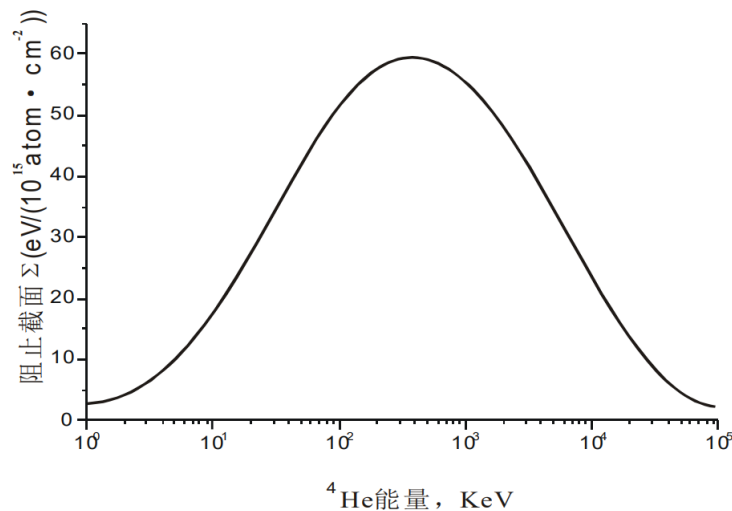


图 1: α 粒子在铝中的阻止截面与能量关系

根据上图，可以得到在能量范围 $1 - 10^5\text{KeV}$ 的经验公式：

$$\Sigma_e = \frac{A_1 E^{A_2} \left\{ \frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right] \right\}}{A_1 E^{A_2} + \frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right]} \quad (8)$$

其中 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 为常数。对于化合物，其组织本领可由布拉格相加规则将化合物的各个组成成分相加：

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c = \frac{1}{A_c} \sum Y_i A_i \left(\frac{dE}{dx}\right)_i$$

其中， Y_i, A_i 分别为化合物分子的第 i 种原子的数目、原子量， A_c 为化合物的分子量。

利用已知的阻止截面，通过 α 粒子在薄箔中能损的测量，可以快速无损地测定薄箔地厚度。 α 粒子的能量可以用多道分析器测量，峰位可按最简单的重心法得到。

1.2 半导体 α 谱仪工作原理

如图为半导体能谱仪的组成：

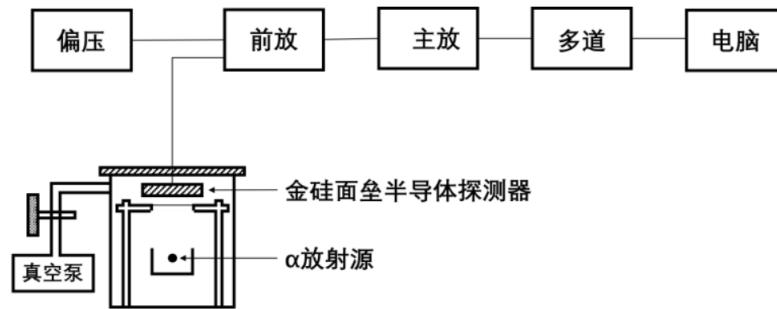


图 2: 半导体 α 谱仪原理示意图

金硅面垒探测器是在一片 N 型硅上蒸上一层薄金层 (10 – 20nm), 使得接近金的一层硅具有 P 型硅的特性, 从而形成 PN 结。PN 结接近表面层, 结区为探测粒子的灵敏区。

探测器工作时施加反向偏压, 粒子在灵敏区损失的能量转变为与其能量成正比的电脉冲信号, 经放大并由多道分析器测量脉冲信号按幅度的分布, 从而给出带电粒子的能谱。若多道分析器的道数不够, 则偏执放大器进行切割, 展宽脉冲幅度, 利于精确分析。

注意:

- 为提高能量分辨率, 探测器最好放在真空中。
- 金硅面垒探测器一般具有光敏特性, 使用时应注意光屏蔽。

带电粒子进入灵敏区, 损失能量产生电子空穴对。形成一对电子空穴所需的能量 W 和半导体材料有关, 与入射粒子类型和能量无关。若灵敏区的厚度大于入射粒子在硅中的射程, 则带电粒子的能量 E 全部损失在其中, 产生的总电荷量 Q 等于 $\frac{E}{W}e$ 。 $\frac{E}{W}$ 为产生的电子空穴对数, e 为电子电量。当外加偏压时, 灵敏区的电场强度很大, 产生的电子空穴对全部被收集, 最后在两极形成电荷脉冲。它在持续时间内的积分等于总电荷量 Q 。通常在半导体探测器设备中使用电荷灵敏前置放大器。它的输出信号与输入到放大器的电荷成正比。

1.3 α 谱仪的能量刻度和能量分辨率

谱仪的能量刻度确定了 α 粒子能量与脉冲幅度之间的对应关系。脉冲幅度大小以谱线峰位或多道分析器中的道址来表示。通常有两种方法确定能量刻度:

1. 用一个 $^{239}\text{Pu}, ^{241}\text{Am}, ^{244}\text{Cm}$ 混合的 α 刻度源, 已知各核素 α 粒子的能量, 测出该能量在多道分析器上所对应的谱峰位道址, 作出能量对应道址的刻度曲线, 并表示为:

$$E = Gd + E_0$$

式中, E 为 α 粒子能量 (KeV), d 为对应能谱峰位所在道址。 G 为直线斜率 (KeV/channel), 称为能量刻度常数。 E_0 为直线截距, 代表由于 α 粒子穿过探测器金层表面所损失的能量。

2. 用一个已知能量的单能 α 源, 配合先行良好的精密脉冲发射器来作能量刻度。这是在 α 源种类较少的实验条件下常用的方法。

对于半导体探测器, 影响能量分辨率的主要因素有: 产生电子空穴对数和能量损失的统计涨落 ΔE_n 、探测器的噪声 ΔE_d 、电子学噪声, 主要是前置放大器的噪声 ΔE_e 、 α 粒子穿过的探测器窗厚和放射源厚度的不均匀性所引



起的能量展宽 ΔE_s 。实验测出的谱线宽度实际上是以上因素的综合，表示为：

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_n^2 + \Delta E_d^2 + \Delta E_e^2 + \Delta E_s^2}$$

2 实验内容

2.1 半导体 α 谱仪

1. 调整谱仪参数，测量不同偏压下的 α 粒子能谱，并确定探测器的工作偏压。
2. 测量谱仪的能量分辨率，并进行能量刻度。
3. 测量未知 α 源的能谱，并确定 α 粒子能量。

2.2 α 能量损失

1. 测量 ^{241}Am 以及 ^{239}Pu 的 α 粒子的能谱，作能量刻度。
2. 测量 ^{241}Am 的 α 粒子通过铝及 Mylar 薄箔后的能谱。
3. 从所测各条能谱，确定非为、半宽度、及 α 粒子通过待测样品后的能量损失，计算阻止本领 $(\frac{dE}{dx})_{mean}$ 以及薄箔的厚度 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)

3 实验仪器

- 精密脉冲发生 FH1012。
- 300V 电源。
- 示波器。
- α 探头（金硅面垒半导体）。
- ^{241}Am α 源， ^{239}Pu α 源，微居里。
- 待测样品，铝箔及 Mylar 膜。
- 电荷灵敏放大器 FH423。
- 线性放大器 FH1002A。
- 微机多道分析器。
- 真空泵。



4 实验步骤

4.1 半导体 α 谱仪

1. 按照图 1 联接仪器。用 ^{241}Am 源调整谱仪，如果在真空室中做实验时，将 α 源 (^{241}Am) 放入真空室抽真空，调整谱仪参数，用示波器测量脉冲幅度随偏压变化范围并测量抽真空与不抽真空条件下输出波形的变化。如果在空气中做此实验时，调整谱仪工作参数，用示波器测量输出脉冲幅度随偏压变化趋势。
2. 选择多道分析器参数，测量 α 谱。改变偏压为：0—120V，分别测量不同偏压下的 α 谱线，从幅度和能量分辨率两方面确定最佳偏压。
3. 用多道分析器测量 ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm 混合刻度源的能谱，作能量刻度曲线，在同样条件下测出未知 α 源的能谱。

4.2 α 粒子能量损失

1. 真空室内安放好放射源并抽成真空（真空度高于 1×10^{-1} 托）调节线性放大器倍数，使 ^{241}Am 的 α 峰位在 400 道附近，测量 ^{241}Am 的 α 能谱。
2. 调节精密脉冲发生器的幅度，使放大器的输出幅度在源 ^{241}Am 的峰位附近，记下发生器的幅度及多道分析器上的峰的道数，然后减小发生器的幅度在 ^{239}Pu 源的峰位附近再测一点，再逐渐减小幅度作若干个点，得到发生器的幅度——道数校正曲线。
3. 在源和探测器之间安放待测薄箔样品，测量能谱（峰面积下的计数约 5×10^4 ）。
4. 应用 (8) 式计算铝的阻止截面 Σ_e ，应用 (6) 式计算铝箔的厚度 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)。粒子 ^{241}Am 的 α 粒子能量可以参考实验讲义的附录 5。

5 实验数据处理

5.1 能量分辨率和偏压关系

通过改变所加偏压，可以得到数据：



表 1: 分辨率 (倒数) 和偏压关系

偏压 (V)	峰位道址	半高宽/峰位 (%)
0	274.20	7.94
6	302.79	5.72
12	358.75	4.83
18	411.18	3.69
24	442.14	3.07
30	458.31	3.03
36	469.34	2.96
42	478.03	2.72
48	482.11	2.81
54	488.85	2.58
60	491.88	2.58
66	493.65	2.65
72	492.28	2.68
78	494.12	2.50
84	494.43	2.75
90	496.41	2.53
96	498.22	2.59
102	499.82	2.60
108	502.14	2.47
114	502.65	2.75
120	502.75	2.55
126	502.37	2.65
132	502.64	2.59

考虑到直观，我们作出图像：

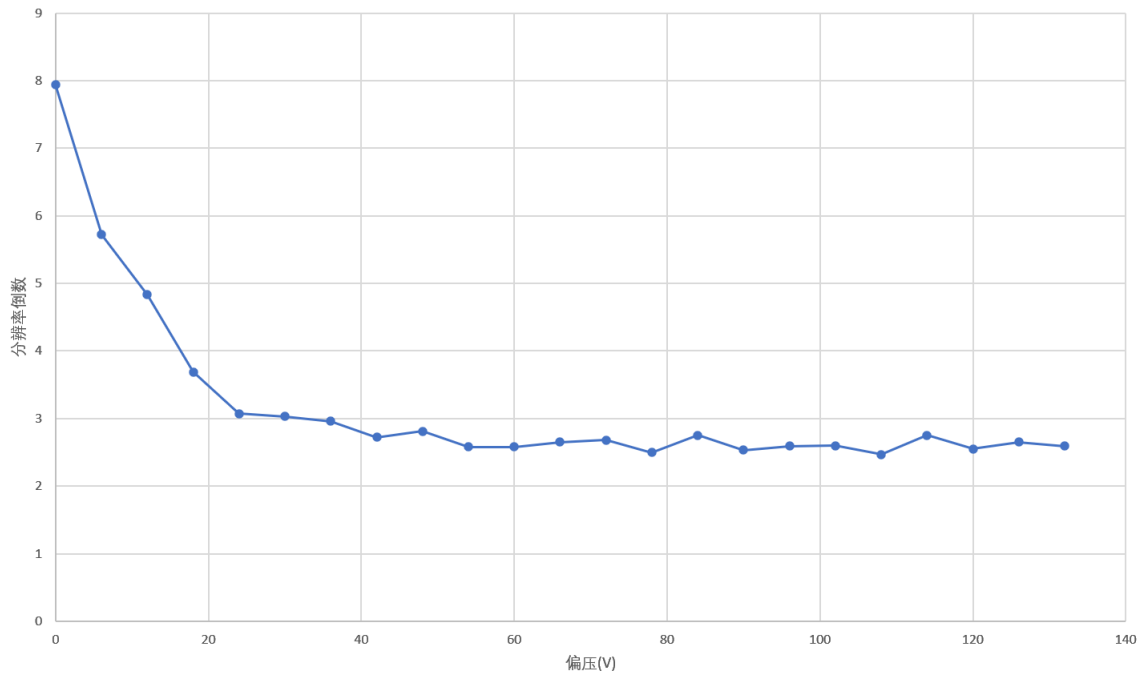


图 3: 分辨率（倒数）和偏压关系图

综合考虑能量分辨率较大（也即半高宽和峰值的比值尽可能小些）和道址尽可能靠右，我们选择 $U = 108V$ 作为测试的基准电压。此后的测试都在此电压下进行。

5.2 能量刻度

从实验室可以查询到所使用放射源的放射粒子能量。通过改变不同的粒子源，我们可以得到道址、能量的关系：考

表 2: 分辨率（倒数）和偏压关系

粒子源	能量	道址	偏压	半高宽/峰位
^{241}Am	5.48MeV	502.14	108V	2.47%
^{239}Pu	5.155MeV	470.93		2.45%

虑两者是线性关系，进行线性拟合，即：

$$E = Gd + E_0$$

其中 d 代表道址。可以得到拟合关系为（只有两个点，恰好确定两个未知数）：

$$E = 0.0104 \times d + 0.2511 \text{ (MeV)}$$

5.3 α 粒子能量损失

对于 ^{241}Am α 源，我们分别在没有薄膜、加入铝薄膜、加入 Mylar 薄膜三种情况下，测量道址，得到数据为：其中能量是通过测量道数，然后根据之前拟合的道数-能量关系得到的。



表 3: 不同种类膜导致的能量损失

粒子源	能量	道址	偏压	半高宽/峰位	薄膜
^{241}Am	5.48MeV	502.14	108V	2.47%	无薄膜
	4.24MeV	383.12		6.47%	铝薄箔
	4.57MeV	415.18		4.00%	Mylar 膜

接下来根据上面的结果来计算薄膜的相关性质。首先，对于铝箔：

$$\Sigma_e = \frac{A_1 E^{A_2} \left\{ \frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right] \right\}}{A_1 E^{A_2} + \frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right]}$$

其中各项系数为：

$$A_1 = 2.5A_2 = 0.625, A_3 = 45.7, A_4 = 0.1, A_5 = 4.359$$

铝的密度为 $\rho = 2.7\text{g/cm}^3$ ，相对原子质量为 26.981538，因此单位体积内的原子数为：

$$N = \frac{\rho}{26.981538} N_A = 6.026 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$$

因此可以得到（令 $E_1 = 4240\text{KeV}$, $E_2 = 5480\text{KeV}$ ）：

$$\Delta X = \int_{E_2}^{E_1} \frac{1}{N \Sigma_e} dE = 7.46 \mu\text{m}$$

即铝箔的厚度为 $7.46 \mu\text{m}$

接下来考虑 Mylar 膜，要将各个元素进行合成：

$$\frac{dE}{dx} = \frac{1}{A_c} \sum Y_i A_i \left(\frac{dE}{dx} \right)_i$$

这样可以给出其总的阻止本领（这不是一个常数）。作为近似，我们给出中间值 $E = \frac{1}{2}(5.48 + 4.57) = 5.025\text{MeV}$ 时的阻止本领：

$$S(E) = 1.0911 \times 10^6 \text{KeV/cm}$$

我们将这个值近似作为线性阻止本领，可以给出：

$$\Delta X = \Delta E / S = 8.34 \mu\text{m}$$

即 Mylar 膜的厚度为 $8.34 \mu\text{m}$ 。

6 思考题

6.1 偏压和能量分辨率关系

从实验得到的图像上来看，偏压提高，能量分辨率也随之提高。但是达到一定偏压后，能量分辨率几乎不变，甚至可能会减小。

选择偏压时，既要使其不能过低，这样才能尽可能收集电荷载流子，提高能量分辨率；同时又不能过高，否则引起暗电流可能会降低信噪比，使能量分辨率反而降低，也有损坏设备的风险。



6.2 α 和 γ 谱仪的道宽

因为 α 粒子带电，和物质发生强烈的电磁相互作用，很快就会因为能量损失而停止，这样的能量损失很集中，所以产生的信号道宽很小；而 γ 光子不带电，他们只能通过光电效应、康普顿散射等形式进行较弱的相互作用，这样的能量损失比较分散，产生的信号道宽会比较大。

6.3 影响谱仪能量分辨率的因素

影响因素可能包括探测器本身设计（例如所选探测材料的性质和厚度），样品到探测器的距离（距离过大可能会导致提前产生能量损失，测出的结果不同），探测器的信号转换时的信噪比、增益等因素（读出时的暗电流和噪声可能会影响信噪比），工作时的偏压和温度等。

6.4 斜入射的能量损失

我们认为， α 粒子的轨迹可以近似为直线，因此与法线有夹角时，在吸收体内的移动距离会有所改变，设夹角为 θ ：

$$\Delta X' = \frac{\Delta X}{\cos \theta}$$

因此能量损失：

$$\Delta E = \int_0^{\Delta X'} S dx$$

若考虑组织本领 S 近似为常数，则：

$$\Delta E = S \Delta X' = \frac{S \Delta X}{\cos \theta}$$

带入 $\theta = 4^\circ, 6^\circ$ ：

$$\Delta E_1 = 1.0024 \times S \Delta X$$

$$\Delta E_2 = 1.0055 \times S \Delta X$$

可以看出，角度比较小的时候，和完全垂直入射的时候相差不大。

6.5 轰击金箔的计算

根据探测器的原理， α 粒子需要在灵敏区中耗散掉所有的能量，因此可以得到， α 粒子的能量存在一个上限，即：

$$E \leq E_0 = \rho \cdot \frac{dE}{dx} \cdot \Delta X = 4.403 \text{KeV}$$

这里，将阻止本领近似成常数进行计算。这是最大可以阻止的能量，也即进入灵敏区时最大可能具有的能量。

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 半导体 α 谱仪和 α 粒子能量损失实验讲义. URL: <http://pems.ustc.edu.cn/uploads/project/20230402/6f230649728523f9739f2c3716d12d56.pdf> (visited on 05/12/2024).